

歩行者交通流におけるエントロピー増大傾向の検証

谷上正晃*¹ 吉井稔雄*²

京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻*¹

京都大学大学院 工学研究科*²

歩行者の安全・快適な移動を支援するため、ITS技術を活用した歩行環境の改善が行われている。歩行者が錯綜するような空間において安全・快適な歩行環境を創出するには、ITSを有効に活用するためにも歩行者の歩行原理を把握することが重要となる。本研究では、歩行者は既往研究よりもより広範囲に渡る歩行者交通流である交通流全体を参照することを次の移動方向を決定する際の一要因としているのではないかという仮定の下、熱力学や情報理論で用いられるエントロピー指標を用いて歩行者交通流を指標化し、歩行者は交通流全体のエントロピーが増大する方向に移動する性向があるという仮説を措定し、歩行者流動実験データを用いて仮説を検証した。

A verification of the pedestrian's property of increasing the entropy

Masaaki TANIGAMI*¹ Toshio YOSHII*²

Kyoto University, Graduate school of Engineering Department of Urban Management*¹

Kyoto University, Graduate school of Engineering Department*²

Pedestrian environment is improved by utilizing ITS technology to support safety and comfortable move. In the congested area to create safety and comfortable pedestrian environment, it's also important to recognize pedestrian's moving principles o utilize ITS effectively. In this research, we assumed that it is one of factors for pedestrians to refer to total pedestrian flow when they decide their moving direction. We used entropy index used in thermal dynamics or information theory to mark pedestrian flow and we made a hypothesis that pedestrians have a bias to move increasing entropy direction. On that basis, we used a data set of pedestrian flow experiment and verified the hypothesis.

Keyword: Pedestrian, Experimental data, Pedestrian psychology, road plan

1. はじめに

1-1 研究背景

平成18年にバリアフリー新法が施行され、高齢者や障害者の安全・円滑な移動を支援するため、段差など危険箇所情報、高精度な現在位置情報、経路案内情報、公共交通機関情報など歩行者や自転車などに対して歩行者ITSサービスが提供されるようになった。一方、多くの歩行者が錯綜する駅のコンコースなどを安全・快適な空間として維持することを考える場合、歩行者の移動性向を把握し、経路誘導など適切な歩行者ITSサービスを提供することが重要となる。そこで、本研究では多様な交通流状態における個々の歩行者の移動性向を検証することを目的とした。

1-2 既往のマイクロモデルと本研究の位置づけ

個々の歩行者挙動を再現しようとするモデルはマイクロモデルと呼ばれるが、既往のマイクロモデル^{2)他}は、上述した個々の歩行者の移動性向に対する評価が十分とは言えないと思われる。さらに既往のマイクロモデルは、歩行者が自らの移動方向を決定する際に参照する情報処理の範囲が一定範囲に限定されている。しかし、歩行者が移動方向を決定する際には、一定範囲の情報はもちろんのこと、さらに広い範囲である交通流全体の状態も参照して移動方向を決定している場合が存在すると考えられる。そこで本研究では、歩行者は交通流全体の状態からの影響を、移動方向を決定する際の一要因としていると仮定した。その上で、交通流全体の状態、具体的には交通流全体における全歩行者の分布形状を熱力学や情報理論で用いられるエントロピー指標を用いて指標化し、歩行者はエントロピーが増大する方向に移動する傾向があるとの仮説を措定し、歩行者流動実験データを用いて仮説を検証した。

2 エントロピーを用いた歩行者交通流解析

2-1 歩行者交通流におけるエントロピーの定義

本研究では、情報理論におけるエントロピー指標を用いて歩行者交通流におけるエントロピーを以下にて定義する。

エントロピーは予め設定した歩行エリアで算定する。最初にエントロピーを算定するエリアを設定し、

設定したエリアを同じ大きさを持つ複数のメッシュに分割することとする(図1)。このとき、以下の値 S を歩行者交通流におけるエントロピーと定義する。

$$S = - \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{N} \log_2 \frac{n_k}{N} \quad (1)$$

m : メッシュ数

N : 設定エリア内の全歩行者数

n_k : k 番目のメッシュ内に存在する歩行者数

なお、上記エントロピーは、エリア内に歩行者が均等に分布すると大きな値をとる性質を有する。

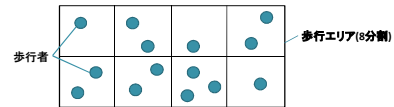


図1 測定エリアを8つのメッシュに区切った例

2-2 エントロピーを用いた仮説の措定

2-1 で定義した歩行者交通流におけるエントロピーを用いて以下の仮説を措定する。

仮説)

「歩行者は歩行者交通流におけるエントロピーが増大する方向に移動する性向を持つ」

つまり、歩行者は歩行者交通流における歩行者の分布形状が均一となる方向に移動する傾向があると仮定する。

図2は3-1で説明する歩行者流動実験において、歩行者が一方向から流入し一方向に流出するデータにおけるエントロピーの時間推移を示したものである。図のようにエントロピーは歩行エリア内の歩行者数が変化することや歩行者が希望する方向に移動しようとすることから常に増大している訳ではない。そこで、2-3で述べる慣性位置と実現位置という概念を導入することで、仮説を検証することとする。

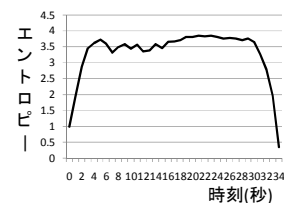


図2 一方通行実験におけるエントロピーの時間推移

2-3 仮説の検証方法

2-2で述べたように、歩行者交通流におけるエントロピーは時間によって変動しており、常に増大しているわけではない。そこで本研究では、以下で述

べる慣性位置と実現位置を用いることで仮説を検証することとした。

図3に示すように、ある時刻 t において、歩行者 i が x - y 平面内の座標

$$\mathbf{p}_i(t) = (x_i(t), y_i(t)) \quad (2)$$

に位置するとき、同瞬間の速度ベクトルを保持したまま Δt 秒間移動すると、

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{p}}_i(t + \Delta t) &= (\hat{x}_i(t + \Delta t), \hat{y}_i(t + \Delta t)) \\ &= (x_i(t) + \Delta t \cdot \dot{x}_i(t), y_i(t) + \Delta t \cdot \dot{y}_i(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

へ移動する。ただし、

$$\dot{x}_i(t) = \frac{dx_i(t)}{dt}, \dot{y}_i(t) = \frac{dy_i(t)}{dt} \quad (4)$$

この位置 $\hat{\mathbf{p}}_i(t + \Delta t)$ を慣性位置、 Δt を経過時間と定義する。

一方で、同経過時間 Δt 秒後に実際に位置した座標

$$\mathbf{p}_i(t + \Delta t) = (x_i(t + \Delta t), y_i(t + \Delta t)) \quad (5)$$

を実現位置と定義する。

ただし、慣性位置を求めるにあたり、時刻 t における歩行者の速度ベクトルを

$$\dot{\mathbf{p}}_i(t) = \frac{\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_i(t - dt)}{dt} \quad (6)$$

として算定する。

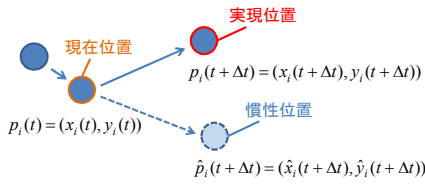


図3 歩行者の現在位置・慣性位置・実現位置

2-4 エントロピー差分

慣性位置と実現位置を用いて、以下で述べる(i), (ii)の二ケースそれぞれについてエントロピー変化を示すエントロピー差分を定義した。

(i) 全歩行者を対象としたエントロピー差分

先行研究³⁾では、全歩行者が実現位置に移動した場合の歩行者交通流全体のエントロピーから全歩行者が慣性位置に移動した場合のエントロピー(図4)を差し引いた値(式(7))を、全歩行者を対象としたエントロピー差分と定義した。

$$D(t + \Delta t) = S(t + \Delta t) - \hat{S}(t + \Delta t) \quad (7)$$

$D(t)$: 時刻 t の全歩行者を対象としたエントロピー差分

$S(t)$: 時刻 t の全歩行者実現位置によるエントロピー

$\hat{S}(t)$: 時刻 t の全歩行者慣性位置によるエントロピー

$D(t + \Delta t)$ が正の値をとる時、歩行者はエントロピーが増大する方向に移動したと考える。つまり、現在の速度ベクトル方向に Δt 秒移動した場合に比べて全歩行者が現実存在する位置のエントロピーが高い場合にはエントロピーが増大する方向に移動したと考える。なお、歩行者が複数のメッシュにまたがる場合は、分割された面積分の人数が当該メッシュに存在することとした。

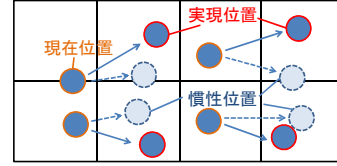


図4 全歩行者を対象としたエントロピー差分

(ii) 歩行者一人を対象としたエントロピー差分

次に、対象歩行者とする一人の歩行者以外は慣性位置に移動すると仮定し(図5), 対象歩行者が実現位置に移動した場合のエントロピーから慣性位置に移動した場合のエントロピーを差し引いた値(式(8))を、歩行者一人を対象としたエントロピー差分と定義した。

$$D_i(t + \Delta t) = S_i(t + \Delta t) - \hat{S}_i(t + \Delta t) \quad (8)$$

$D_i(t)$: 時刻 t の歩行者一人を対象としたエントロピー差分

$S_i(t)$: 時刻 t の歩行者 i 実現位置によるエントロピー

$\hat{S}_i(t)$: 時刻 t の歩行者 i 慣性位置によるエントロピー

ケース(ii)においては、 $D_i(t + \Delta t)$ が正の値をとる時、個々の歩行者が、エントロピーが増大する方向に移動したと考える。

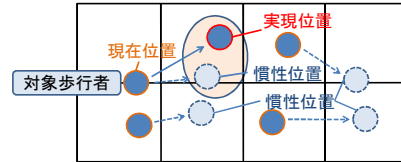


図5 歩行者一人を対象としたエントロピー差分

3 実験データを用いた仮説の検証

3-1 歩行者流動実験

エントロピーを用いた歩行者交通流解析を行うにあたり、以下による歩行者流動実験データを用いた。実験⁴⁾は、2006年5月23日、東京大学生産技術研

究所 A 棟前で行われた。赤白の帽子をかぶった被験者 93 名(うち女性 17 名, 大半は 20~30 代前半の学生)に, 通学・通勤時の状況を想定して幅 3m, 長さ 6m の歩行空間 (図 6) を歩くように要請した。

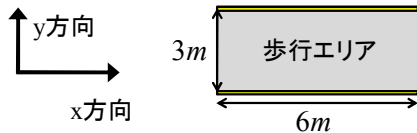


図 6 歩行空間

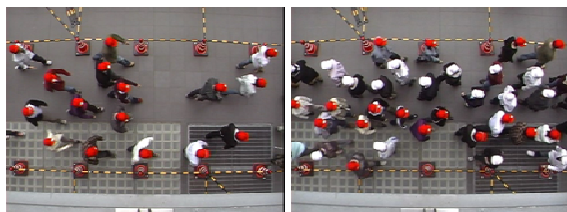


図 7 ビデオ画像(左: 一方通行実験, 右: 対面通行実験)

用いるデータは, ①全被験者が同一方向に進行するケース(一方通行実験, 図 7 左)②歩行区間の両側から被験者が進入し, それぞれ対向して進行するもの(対面通行実験, 図 7 右)の 2 ケースである。被験者の位置は, 区間上方より撮影したビデオ画像(図 7)から 0.2 秒ごとに読み取った。

3-2 メッシュサイズと経過時間

エントロピーの値はメッシュサイズに依存する。そこで, 先行研究³⁾において, 数パターンのメッシュサイズで一方通行実験における全歩行者を対象としたエントロピー差分が計算されている。(表 1)。“母集団の平均が 0 である”との帰無仮説を掲げ, 検定を行ったところ, 同仮説はいずれのケースにおいても危険率 5%で棄却され, 全てのメッシュサイズにおいてエントロピーが正値をとることがわかった。以後メッシュサイズはエントロピー差分が最大値をとる幅 1m×長さ 1m とする。

表 1 数例のメッシュサイズによるエントロピー差分

| | | 長さ0.75m | 長さ1m | 長さ1.5m |
|--------|----|---------|-------|--------|
| 幅0.75m | 平均 | 0.025 | 0.017 | 0.020 |
| | 分散 | 0.014 | 0.013 | 0.019 |
| 幅1m | 平均 | 0.039 | 0.040 | 0.039 |
| | 分散 | 0.010 | 0.011 | 0.012 |
| 幅1.5m | 平均 | 0.032 | 0.027 | 0.028 |
| | 分散 | 0.024 | 0.014 | 0.011 |

図 8 は経過時間別のエントロピー差分を示している。経過時間が小さすぎると慣性位置と実現位置の差がなくなり, エントロピー差分が 0 となる状況が

多く存在することとなる。先行研究³⁾により経過時間が 0.8 秒以上で慣性位置と実現位置が乖離するとその結果が得られていることから, 以後経過時間は 0.8 秒とする。

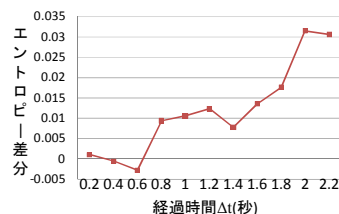


図 8 経過時間別エントロピー差分

3-3 集計結果

計算対象時間は, 一人目の歩行者が図 9 に示す 5m × 3m のエントロピー計算エリアから流出してから, 最後の歩行者が計算エリアに流入するまでの時間とした。

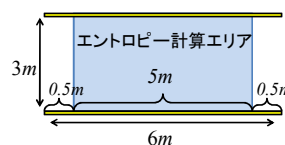


図 9 エントロピー計算エリア

速度ベクトルを求める際に用いるパラメータ dt は, 1 フレーム分の時間(0.2 秒)として計算を行った。

(i) 全歩行者を対象としたエントロピー差分

表 2 に一方通行実験・対面通行実験の全歩行者を対象としたエントロピー差分の平均と標準偏差を, 図 10, 図 11 にエントロピー差分の頻度分布を示す。一方通行実験・対面通行実験ともに”平均が 0 である”との帰無仮説を用いて, 検定統計量 $t = \frac{\mu}{S/\sqrt{n-1}}$ (μ : 標本平均, S : 標本標準偏差, n : サンプル数)を用いて, 危険率 1%で検定を行った結果, 平均値が 0 であるとは言えないとの結果が得られた。すなわち, 両実験ともに, エントロピー差分の期待値が正値をとることが統計的に支持された。すなわち, 歩行者は全体としてエントロピーが増大する方向に移動する傾向があるとの仮説を支持する結果が得られた。

表 2 全歩行者を対象としたエントロピー差分結果

| | μ | σ | t値 | n |
|--------|----------------------|----------------------|------|-----|
| 一方通行実験 | 3.5×10^{-2} | 6.1×10^{-2} | 6.4* | 126 |
| 対面通行実験 | 1.2×10^{-2} | 4.3×10^{-2} | 2.8* | 96 |

(μ : 標本平均, σ : 標本標準偏差, n : サンプル数, *は 1%有意)

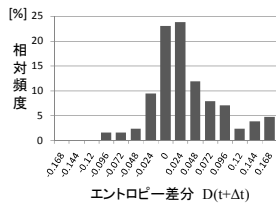


図 10 全歩行者・一方通行実験の頻度分布

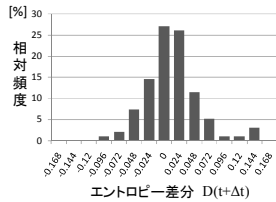


図 11 全歩行者・対面通行実験の頻度分布

(ii) 歩行者一人を対象としたエントロピー差分

表 3 に一方通行実験・対面通行実験の歩行者一人を対象としたエントロピー差分の平均と標準偏差を、図 12、図 13 にエントロピー差分の頻度分布を示す。一方通行実験・対面通行実験ともに”平均が 0 である”との帰無仮説を用いて、危険率 1% で検定を行った結果、エントロピー差分の期待値が正值をとることが統計的に支持された。すなわち、個々の歩行者もエントロピーが増大する方向に移動する傾向があるとの仮説を支持する結果が得られた。

表 3 歩行者一人を対象としたエントロピー差分結果

| | μ | σ | t値 | n |
|--------|-----------------------|----------------------|------|------|
| 一方通行実験 | 1.3×10^{-2} | 7.5×10^{-2} | 6.3* | 1347 |
| 対面通行実験 | 0.50×10^{-2} | 4.5×10^{-2} | 5.2* | 2163 |

(μ : 標本平均, σ : 標本標準偏差, n : サンプル数, *は 1% 有意)

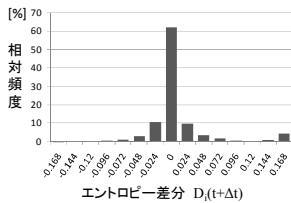


図 12 歩行者一人・一方通行実験の頻度分布

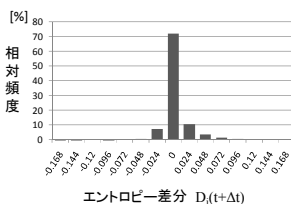


図 13 歩行者一人・対面通行実験の頻度分布

3-4 加速度の回帰分析方法

3-3 の集計結果より、歩行者はエントロピーが増大する方向に移動する一定の傾向があるとの結果が得られた。そこで次に、歩行者モデルに不可欠な項とされる⁵⁾、希望速度方向への加速を表現する項を考慮して歩行者の挙動を解析することとした。解析方法として、個々の歩行者の加速度を、エントロピーによる影響を表現する項と希望速度方向への加速を表現する項を説明変数として回帰分析を行うこととした。

まず、説明変数・目的変数ともにベクトル量であるため、以下に示す f 方向、s 方向別に回帰分析を行うこととした。

・f 方向と s 方向

加速度の回帰分析を行う歩行者の現在の速度ベクトル方向を f 方向、f 方向を反時計回りに 90° 回転させた方向を s 方向とする(図 14)。

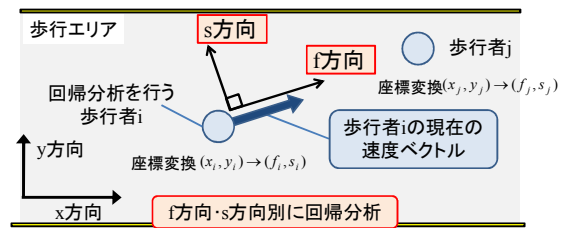


図 14 f 方向と s 方向

説明変数については以下のように設定した。
・エントロピー微分値

回帰分析を行う歩行者の慣性位置(経過時間 0.8 秒)を f-s 平面の原点とし、f 方向・s 方向にそれぞれ Δf 、 $\Delta s (=0.1m)$ 移動させた場合のエントロピーから移動させていない場合のエントロピーを差し引いた値をエントロピー微分値とした(図 15)。なお、エントロピー微分値の回帰係数が正の値をとるとき、歩行者はエントロピーが増大する方向に加速する傾向があると言える。

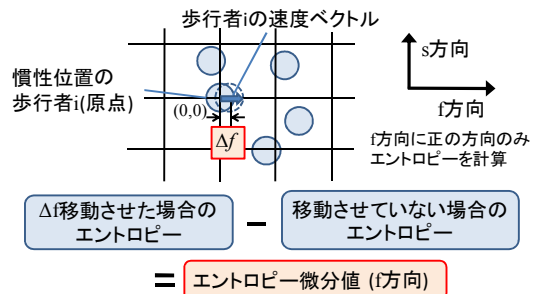


図 15 f 方向を例としたエントロピー微分値

・希望速度ベクトルと現在の速度ベクトルの差

希望方向への速度ベクトルとして、歩行者流動実験データの x 方向に、通勤時の平均速度とされる⁶⁾一定値 1.54[m/s]と設定した。この希望速度ベクトルと現在の速度ベクトルのベクトル差を希望速度ベクトルと現在の速度ベクトルの差とした(図 16)。こちらにも、回帰係数が正の値をとるとき、歩行者は希望速度方向に加速する傾向があると言える。

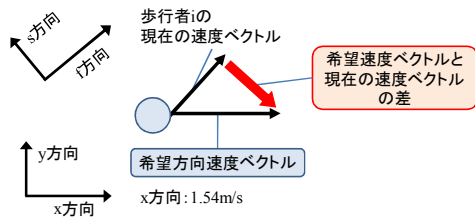


図 16 希望速度ベクトルと現在の速度ベクトルの差

以上の説明変数を用いると、回帰式は式(9)となる。なお、切片を 0 と仮定した。これは全ての説明変数が 0 である時、目的変数である加速度が 0 となると考えられるためである。

$$y = \mathbf{a}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_2 \mathbf{x}_2 = \begin{pmatrix} a_{1f} x_{1f} \\ a_{1s} x_{1s} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{2f} x_{2f} \\ a_{2s} x_{2s} \end{pmatrix} \quad (9)$$

y : 加速度ベクトル

\mathbf{x}_1 : エントロピー微分値

\mathbf{x}_2 : 希望速度ベクトルと現在の速度ベクトルの差

3-5 回帰分析結果

以上の設定をもとに歩行者流動実験における一方通行実験データに対して加速度の回帰分析を行った。表 4 に f 方向・s 方向それぞれの結果を示す。回帰式の実験データに対する適合度を示す決定係数は、f 方向は 0.3 程度、s 方向は 0.2 程度という結果が得られた。人間の意思決定過程が非常に複雑であることを勘案すれば、歩行者の移動傾向を一定程度説明できているのではないかと考えられる。次にそれぞれの説明変数に対する回帰係数については、エントロピー微分値は s 方向については有意な結果は得られなかったものの正値が得られ、f 方向については有意に正の値が得られた。つまり f 方向についてはエントロピーが増大する方向に加速する傾向があるとの仮説を支持する結果が得られた。希望速度ベクトルと現在の速度ベクトルの差については、f 方向・s 方向ともに、有意に正の値が得られ、歩行者が希望速度方向へ加速する傾向があるとの結果が得られた。

表 4 回帰分析結果

f方向結果

| | |
|-------------|-------|
| 自由度調整済み決定係数 | 0.342 |
| サンプル数 | 864 |

| | 標準偏回帰係数 | t値 |
|----------------------|---------|-------|
| エントロピー微分値 | 0.923 | 4.95* |
| 希望速度ベクトルと現在の速度ベクトルの差 | 0.160 | 21.0* |

s方向結果

| | |
|-------------|-------|
| 自由度調整済み決定係数 | 0.190 |
| サンプル数 | 864 |

| | 標準偏回帰係数 | t値 |
|----------------------|---------|-------|
| エントロピー微分値 | 0.058 | 1.11 |
| 希望速度ベクトルと現在の速度ベクトルの差 | 0.205 | 14.2* |

(*は 1%有意)

4 まとめ

本研究の検証から、集計結果より歩行者は歩行者交通流におけるエントロピーが増大する方向に移動する傾向があることが示唆された。さらに、回帰分析結果から、一方通行の歩行者流に関しては、希望方向速度とエントロピーによる影響から歩行者の行動をある程度予測可能であるとの知見が得られた。今後は、歩行者間の斥力を新たな説明変数として加えるとともに、対面通行実験に対して加速度の回帰分析を適用することを予定している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京大学生産技術研究所桑原研究室より貴重な歩行者流動実験データを頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 西坂秀博：歩道幅員に関する研究，交通工学 vol.10,No.5, pp.23-34, 1975.
- 2) 浅野美帆，井料隆雅，桑原雅夫：交錯交通の容量評価のためのマイクロ歩行者行動モデル，交通工学，vol.43,No.4, pp.80-89, 2008
- 3) 森田勝也，吉井稔雄，北村隆一：エントロピーを用いた歩行者交通流解析，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集 IV-30
- 4) 浅野美帆，桑原雅夫，田中伸治：混雑時におけるマイクロ歩行者流動モデルの構築，第 5 回 ITS シンポジウム，pp419-424, 2006
- 5) Dirk Helbing and Peter Molnar : Social force model for pedestrian dynamics, The American Physical Society, pp4282-4286,1995
- 6) 塚口博司，高宮進，山中英生，秋山哲男：交通工学ハンドブック 2005 年版，第 3 章歩行者及び自転車，pp3-3-1~3-3-25,2005